

بهبود مدل گذرای ترانسفورماتور توزیع به منظور حفاظت شبکه فشارضعیف در برابر امواج صاعقه

پیمان غلامی^۱، نبی‌اله رضانی^۲، فریدالدین صفایی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه برق، دانشگاه علم و فناوری مازندران

peyman.gholami@mazust.ac.ir

^۲ دانشیار گروه برق، دانشگاه علم و فناوری مازندران

ramezani@mazust.ac.ir

^۳ دکتری برق، همکاری با دانشگاه علم و فناوری مازندران

farid.safaii@yahoo.com

چکیده

علیرغم پیشرفت‌هایی که در حفاظت از اضافه ولتاژ گذرا در طول سال‌ها صورت گرفته است صاعقه همچنان عامل اصلی آسیب به تجهیزات در شبکه‌های توزیع فشارضعیف (LV) بوده است. تجزیه و تحلیل اضافه ولتاژهای منتقل شده به این شبکه‌ها به دلیل افزایش تعداد دستگاه‌های الکترونیکی حساس در برابر اضافه ولتاژ بسیار مهم است. ترانسفورماتورهای یکی از اجزای مهم شبکه توزیع با اتصال نهایی تأسیسات فشارضعیف (LV) به شبکه توزیع فشار متوسط (MV) هستند که به‌عنوان دروازه‌ای برای انتقال اضافه ولتاژهای ناخواسته گذرا از شبکه MV به شبکه LV عمل می‌کنند. این مقاله با استفاده از مدل‌های دقیق فرکانس بالای کلیه اجزای شبکه توزیع به بررسی اضافه ولتاژهای انتقالی از طریق ترانسفورماتور توزیع بر روی شبکه LV می‌پردازد. همچنین تأثیر عواملی چون مدل‌سازی اسپارک‌گپ، برقگیر، رفتار گذرای سیستم زمین‌با لحاظ کردن یونیزاسیون خاک و تغییر طول و تعداد فیدرها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی شبکه نمونه و تجهیزات آن توسط نرم‌افزار ATP-EMTP انجام شده است.

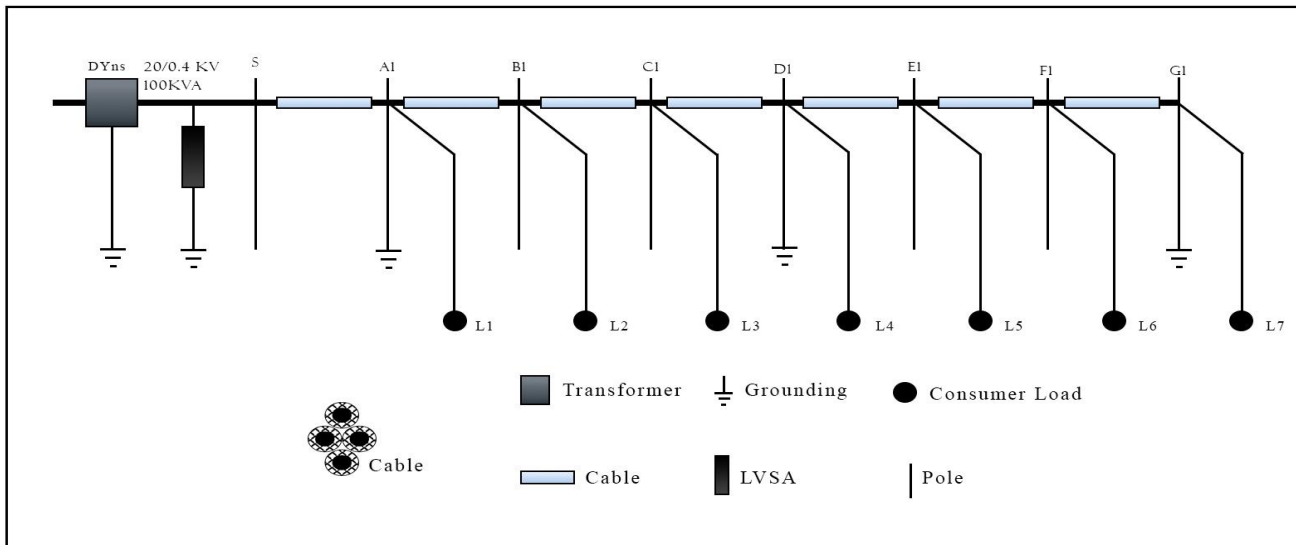
کلمات کلیدی

اضافه ولتاژهای صاعقه، ترانسفورماتور توزیع، سیستم زمین، شبکه توزیع

ولتاژ بر روی خط می‌شود که در شبکه‌های توزیع پدیده‌ای رایج است. این افزایش ولتاژها با عبور از ترانسفورماتورهای توزیع و رسیدن به پایانه‌های مصرف‌کنندگان، منجر به آسیب‌هایی در شبکه می‌شوند [۲]. به همین دلیل، لازم است تأثیر مدل‌های فرکانس بالای شبکه توزیع مورد بررسی قرار گیرد و راهکارهای حفاظتی مناسب پیشنهاد شود. به همین دلیل، تعداد زیادی از تحقیقات اخیر توسط پژوهشگران بر روی ارزیابی اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه در شبکه توزیع متمرکز شده است [۱-۷].

۱- مقدمه

در شبکه‌های توزیع، به دلیل محدودیت ارتفاع خطوط هوایی و وجود ساختمان‌ها و درختان در اطراف خطوط، احتمال برخورد مستقیم صاعقه به خطوط بسیار کم است و بیشتر ضربات صاعقه به زمین اطراف خطوط برخورد می‌کند [۱]. این برخورد صاعقه با زمین اطراف خط، باعث القای



شکل (۱): شبکه مورد مطالعه

پایانه‌های ترانسفورماتور با ابزارهای معمولی شناسایی می‌شوند. در [۹]، یک مدل ترانسفورماتور جعبه سفید همراه با معرفی یک روش شناسایی پارامتر جدید بر اساس استفاده از الگوریتم برازش برداری^۲ به داده‌های امپدانس در ترکیب با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۴ بدست آمده است. مزیت اصلی مدل‌های جعبه سفید این است که امکان تحلیل دقیقی اضافه ولتاژهای داخلی و پیش‌بینی جریان‌های گردابی و تلفات در مناطق مختلف هندسه ترانسفورماتور را فراهم می‌کنند. اما اشکال اصلی در مدل‌های جعبه سفید محاسبات زیاد در بدست آوردن پارامترها و نیاز به دانستن طراحی داخلی ترانسفورماتور است. این اطلاعات متعلق به سازنده است و عموماً در دسترس نیست.

در مرجع [۱۰] یک روش توسعه یافته بر اساس روش مدل‌سازی خط انتقال^۵ با هدف نمایش یونیزاسیون خاک برای شبیه‌سازی سیستم‌های زمین ارائه می‌کند. این پدیده طبیعی را می‌توان با در نظر گرفتن تغییرات اجزای رسانای موجود در مدار مدل نشان داد. فرمول تحلیلی پیشنهادی با تمرکز بر اجرای محاسباتی روش مدل‌سازی خط انتقال در یک بعد معرفی شده است.

این مقاله، با استفاده از مدل‌های دقیق فرکانس بالا به بررسی اثرات اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه و ضربه‌های منتقل شده از ترانسفورماتور به شبکه توزیع می‌پردازد. علاوه بر این، تأثیر عواملی از قبیل مدل‌سازی اسپارک گپ، برقگیر، رفتار گذرای سیستم زمین باتوجه به یونیزاسیون خاک و اثر مقاومت ویژه خاک نیز در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

در سیستم‌های توزیع MV، ترانسفورماتورهای زیر ۲۰۰ کیلوولت‌آمپر معمولاً با استفاده از اسپارک گپ^۱ حفاظت می‌شوند، در حالی که ترانسفورماتورهای بزرگتر معمولاً دارای برقگیر هستند. به دلیل فلاش‌اوری^۲ اسپارک گپ، یک نوسان در شکل موج ضربه ایجاد می‌شود که منجر به افزایش اضافه ولتاژ می‌شود [۲]. به علت سطح استقامت عایقی نسبتاً پایین خطوط هوایی شبکه توزیع و وجود بارهای حساس، این اضافه ولتاژها می‌توانند باعث آسیب رساندن به شبکه شوند.

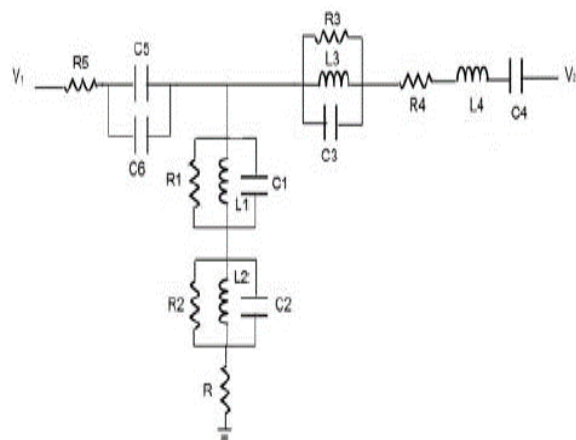
مرجع [۳] شبکه‌های فشارضعیف را در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه مورد ارزیابی قرار می‌دهد اما حضور خطوط فشار متوسط و ارتباط آن با خطوط فشارضعیف از طریق ترانسفورماتورهای توزیع، هنگام محاسبه ولتاژهای ناشی از صاعقه نادیده گرفته شده است. در [۴] به ارزیابی جذب انرژی صاعقه توسط برقگیرها که برای محافظت از ترانسفورماتورهای توزیع استفاده می‌شوند پرداخته شده است اما تأثیرات بار و خطوط فشارضعیف نادیده گرفته شده است. در مرجع [۵] مدل‌سازی‌هایی از سیستم توزیع انجام شده است، که در آن تأثیر برقگیر و نوع بارها بر اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه بررسی شد، اما از سیستم زمین ساده به صورت مقاومت استفاده شده است. همچنین یک شبکه‌ی توزیع پیچیده در [۶ و ۷] مدل‌سازی شد اما از مدل‌سازی اسپارک گپ و تأثیر آن بر روی اضافه ولتاژهای منتقل شده از ترانسفورماتور چشم‌پوشی شده است.

در مرجع [۸] یک روش مدل‌سازی جعبه سیاه جامع و ساده برای ترانسفورماتورهای توزیع در محدوده فرکانس ۱ کیلوهرتز تا ۱ مگاهرتز پیشنهاد شده است. پارامترهای مدل با استفاده از یک روش بهینه‌سازی روی مجموعه‌ای از داده‌های اندازه‌گیری شده از توابع انتقال ثبت شده در

۲- مدل‌سازی گذرای اجزای شبکه توزیع

برای محاسبه اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه در شبکه توزیع یک شبکه نمونه مطابق شکل (۱) در نظر گرفته می‌شود. در این شبکه بارهای سه فاز L7-L1 متصل به شبکه فشارضعیف از طریق یک ترانسفورماتور توزیع با ظرفیت ۱۰۰ KVA تغذیه می‌شوند.

برای شبکه LV از کابل تک هسته XLPE ۴×۳۵ استفاده شده است (۳ فاز و نول). همچنین فرض می‌شود که از سیستم زمین TN-C استفاده می‌شود و بار مصرفی از یک سمت به فاز و از سمت دیگر به نول متصل است.



شکل (۲): مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور توزیع

مدل ترانسفورماتور استفاده شده مبتنی بر نظریه شبکه دو پورت^۸ است که با مدار معادل T نمایش داده می‌شود. برخلاف مدل‌های جعبه سفید که پارامترهای آن‌ها از روابط ریاضی پیچیده و از اطلاعات محرمانه ساخت ترانسفورماتور بدست می‌آید [۹]، پارامترهای مدل با آزمایش‌های مدار باز و بر اساس دو فرکانس رزونانس محاسبه می‌شود. همچنین مدل ترانسفورماتور در محدوده فرکانس ۱ کیلوهرتز تا ۱۰ مگاهرتز و برای شرایط بدون بار و زیر بار مناسب است. مدل استفاده شده علاوه بر سادگی، دقت بالایی نیز دارد و با توجه به این که دو فرکانس رزونانس در مدل‌سازی ترانسفورماتور لحاظ شده، دقت مدل افزایش یافته است. جدول (۱) شامل پارامترهای یک ترانسفورماتور با ظرفیت ۱۰۰ KVA محافظت شده با استفاده از اسپارک گپ، قابل مشاهده است.

جدول (۱): پارامترهای مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور توزیع

R1 (Ω)	۵۰۰	L3 (mH)	۰.۰۳۶۸۹۷
R2 (Ω)	۵۵۸.۵۴۰۵	L4 (mH)	۰.۰۴۸۲۹۶
R3 (Ω)	۱۰۰۰	C1 (μF)	۰.۰۲۱۰۶۳
R4 (Ω)	1×10^{-6}	C2 (μF)	۰.۰۰۳۰۲۹۶۷
R5 (Ω)	1×10^{-9}	C3 (μF)	۰.۰۰۵۱۲
R (Ω)	۱۵۰۰	C4 (μF)	۰.۰۰۰۲۲۱۶۷
L1 (mH)	۰.۰۰۸۵۶	C5 (μF)	۰.۰۰۰۴۲۲۱
L2 (mH)	۰.۰۰۴۶	C6 (μF)	۰.۰۰۰۱۹۱۵۲

۳-۲- مدل برگیر

امروزه، برگیرهای اکسید فلزی^۹ به طور گسترده در سیستم‌های قدرت برای حفاظت از تجهیزات در برابر افزایش ولتاژ ناشی از صاعقه مورد استفاده قرار می‌گیرند. این برگیرها ویژگی‌هایی نظیر مشخصات غیرخطی ولتاژ - جریان مناسب، تلفات کم در ولتاژ نامی شبکه، قابلیت

۲-۱- مدل‌سازی صاعقه

در شبکه‌های توزیع، احتمال برخورد مستقیم صاعقه به خطوط به دلیل وجود ساختمان‌ها و درختان بلند کم است، اما احتمال بروز برخورد غیرمستقیم و القای ولتاژ همواره وجود دارد. مرجع [۱۱] به بررسی اثرات اضافه ولتاژهای القایی ناشی از برخورد موج صاعقه به زمین اطراف و ضربه‌های الکترومغناطیسی^۷ پرداخته است و با در نظر گرفتن کانال پایه صاعقه به‌عنوان یک آنتن در یک محیط با رسانایی کامل و حل معادلات ماکسول بر این مبنا، معادلات میدان‌های الکترومغناطیسی در اطراف کانال صاعقه را ارائه کرده است. در مرجع [۱۲] برای محاسبه اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه در نزدیکی خطوط هوایی شبکه توزیع طبق فرمول راسک که در سال ۱۹۵۸ ارائه شد، از یک تابع توزیع احتمال جریان صاعقه استفاده می‌شود.

در این مقاله برای مدل‌سازی صاعقه برگشتی از مرجع [۱۳] بهره گرفته شده است، که در آن می‌توان مشخصات موج را با استفاده از معادلات راسک^۷ و با در نظر گرفتن الگوی توزیع جریان صاعقه و فاصله نقطه برخورد از خط مشخص نمود.

۲-۲- مدل ترانسفورماتور

برای بررسی افزایش ولتاژهای منتقل شده از شبکه MV به LV، یک مدل ترانسفورماتور توزیع دقیق فرکانس بالا ضروری است. مدل‌های فرکانس بالای مختلفی برای ترانسفورماتور ارائه شده است [۱۹، ۸، ۲]. در این مقاله، از مدل معرفی شده در مرجع [۲] مطابق با شکل (۲) استفاده شده است.

ترکیب بار با تغییرات فصلی و آب‌وهوا و عدم مشخص بودن ویژگی‌های دقیق بارها، به‌ویژه برای تغییرات بزرگ ولتاژ و فرکانس است. در این مقاله، از یک بار مقاومتی به‌صورت تصادفی در محدوده ۱ تا ۲ کیلووات استفاده شده است. به‌عنوان مثال، توزیع بار از نقطه A1 تا نقطه G1 به ترتیب ۱، ۱.۵، ۱، ۱، ۲ و ۱.۵ کیلووات است.

۲-۵- مدل سیستم زمین

وجود یک سیستم زمین مناسب برای عملکرد برقگیرها، رله‌ها و سایر وسایل حفاظتی امری ضروری است. همچنین برای بررسی تأثیرات اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه، لازم است که یک مدل جامع و مناسب از سیستم زمین در دسترس باشد. در مدل‌سازی سیستم زمین تحت فرکانس‌های بالا، یکی از اساسی‌ترین مواردی که باید مدنظر قرار گیرد، پدیده یونیزاسیون خاک است که از لحاظ رفتار بسیار پیچیده بوده و گنجاندن شرایط آن در معادلات مشکل است، به همین دلیل اغلب از آن چشم‌پوشی می‌شود. این پدیده خصوصیات فضای اطراف الکتروود را به طور محسوسی تغییر می‌دهد و باعث می‌شود که خاک اطراف الکتروود تا شعاع مشخصی دارای خاصیت رسانایی شود.

اکثر پژوهش‌ها به دلیل پیچیدگی رفتار زمین در برابر ضربات صاعقه از مدل‌سازی سیستم زمین به صورت یک مقاومت استفاده می‌کنند [۱۵]. یکی دیگر از روش‌های ساده برای مدل‌سازی سیستم زمین در فرکانس بالا استفاده از تئوری مدار است. در این روش بدست آوردن پارامترها و همچنین پیاده‌سازی آن به آسانی صورت می‌گیرد [۱۶]. روش خط انتقال در میان روش‌های مدل‌سازی، روشی است که به شکل قابل قبول و با دقت مناسبی می‌تواند پدیده یونیزاسیون خاک را لحاظ کند [۱۷].

در این مقاله از سه مدل مختلف برای مدل‌سازی سیستم زمین استفاده شده است:

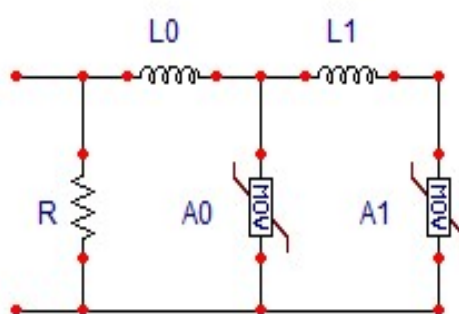
- مدل مقاومتی [۱۵].
- مدل مداری سیستم زمین با در نظر گرفتن پارامترهای خاک [۱۶ و ۱۵].
- مدل سیستم زمین با استفاده از روش خط انتقال با در نظر گرفتن یونیزاسیون و مقاومت ویژه خاک [۱۰، ۱۶ و ۱۷].

برای زمین کردن ترانسفورماتور از دو سیم به طول ۸ و ۱۰.۷ متر و از میله‌های فولادی گالوانیزه ۰.۶ متری با سطح مقطع ۲۵ میلی‌متر و همچنین برای زمین کردن نول در طول شبکه از یک سیم به طول ۸ متر و از میله‌های فولادی گالوانیزه ۰.۶ متری با سطح مقطع ۲۵ میلی‌متر استفاده شده است.

در شکل (۴) مدل فرکانس بالای سیستم زمین نمایش داده شده است.

اطمینان بالا در زمان عملکرد، پاسخ سریع به اضافه ولتاژها و عمر طولانی دارند که از مزایای مهم برقگیرهای اکسید فلزی به حساب می‌آیند. اهمیت مدل‌سازی برقگیرها برای مطالعات هماهنگی عایقی، تحقیقات قابلیت اطمینان و جابجایی بهینه برقگیرها بسیار بالاست؛ بنابراین، تأکید فراوانی بر مدل‌سازی دقیق برقگیرها شده و همچنان نیز ادامه دارد.

برقگیر مورد استفاده در این مقاله توسط پین سیتی^۱ ارائه شده که در شکل (۳) نشان داده شده است [۱۴].



شکل (۳): مدار معادل برقگیر

پارامترهای مدل برقگیر مورد استفاده و مشخصات آن به ترتیب در جدول‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌شود.

جدول (۲): پارامترهای برقگیر

R0 (MΩ)	L0 (mH)	L1 (mH)
۱	۰.۰۶	۰.۰۰۴۸

جدول (۳): مشخصات فنی برقگیر

۰.۲۴	ولتاژ کار دائم (KV)
۱۰	جریان تخلیه نامی (KA)
۰.۰۸۴	ولتاژ باقیمانده به‌ازای جریان ۱۰KA - ۲۰ μs
۰.۰۶۲	ارتفاع ستون برقگیر

۲-۴- مدل بار

سطح اضافه ولتاژ یک شبکه توزیع به طور قابل توجهی به بارهای متصل شده وابسته است، و استفاده از مدل‌های دقیق‌تر منجر به نتایج شبیه‌سازی بهتر و قابل اعتمادتر می‌شود. مدل‌سازی بار همواره با عدم قطعیت‌های زیادی روبرو است، اما هدف اصلی این است که یک مدل بهینه‌سازی شده را بدست آورده و به مدل واقعی نزدیک شود. دلایلی برای عدم قطعیت در مدل‌سازی شامل زیاد بودن وسایل تشکیل‌دهنده بار، عدم دسترسی به اطلاعات مشترکان، نداشتن اطلاعات درست از نحوه مصرف، تغییرات در

l و a و h و به ترتیب طول و شعاع و عمق دفن الکتروود برحسب متر و ρ_s مقاومت مخصوص خاک ($100 \Omega/m$) می‌باشد. ϵ_r ثابت دی‌الکتریک نسبی خاک، ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک خلأ ($10^{-12} F/m$) و μ_0 ضریب نفوذ مغناطیسی خلأ ($10^{-6} H/m$) می‌باشد. δ ضریب اثر پوستی، ρ_s مقاومت ویژه هادی، R_0 مقاومت زمین استاتیک (Ω)، $R(t)$ و $G(t)$ مقدار مقاومت و رسانایی غیرخطی الکتروود زمین برحسب Ω و U هستند. $I(t)$ جریان الکتروود است که از صاعقه ناشی می‌شود و I_g مقدار حد جریانی است که یونیزاسیون خاک از آن آغاز می‌شود (هرود برحسب آمپر). E_{cr} مقدار شدت میدان الکتریکی بحرانی است که اغلب در $300-400$ kV/m در نظر گرفته می‌شود.

$G(t)$

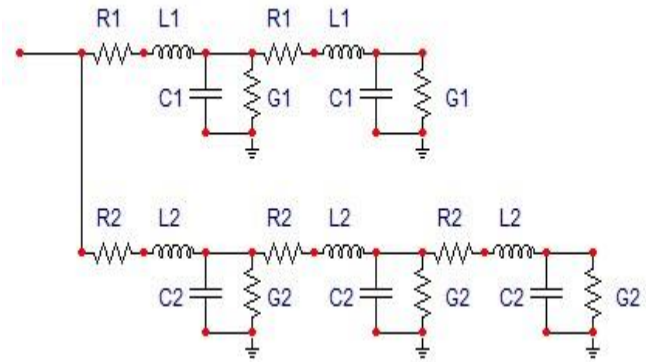
جدول (۴): پارامترهای سیستم زمین

R1(m Ω)	۶.۸۴	L1(μ H)	۴.۷۰
G1(Ω)	۳۹.۸	L2(μ H)	۴.۲۴
R2(m Ω)	۶.۱۶	C1(nF)	۰.۲۱
G2(Ω)	۴۴.۲	C2(nF)	۰.۱۹

۳- نتایج شبیه‌سازی

شبکه مورد مطالعه مطابق شکل (۱) مدل شده است. شبیه‌سازی با استفاده از اضافه ولتاژ القایی ۹۴.۵ کیلوولت، ۰.۹/۹۰.۴ میکروثانیه به‌عنوان منبع صاعقه در سمت اولیه ترانسفورماتور توزیع انجام شده است که با استفاده از فرمول راسک، با در نظر گرفتن توزیع جریان صاعقه و فاصله نقطه برخورد از خط انتقال تعیین شدند. این تکلنه یک اضافه ولتاژ القایی غیرمستقیم را نشان می‌دهد که دارای مقدار زمان تا نصف بسیار کوتاه‌تر از جریان صاعقه هستند. باین حال، معیارهای استفاده شده برای انتخاب مقدار اندازه موج صاعقه، به ویژگی‌های اسپارک گپ وابسته می‌باشند. این ویژگی‌ها متوسط مقدار آن را برابر با ۹۴.۵ کیلوولت تعیین می‌کنند که برای هر فاز به‌طور یکسان در نظر گرفته می‌شود. این روش بر اساس این واقعیت اتخاذ شده است که ولتاژهای القایی توسط صاعقه‌های مجاور در خطوط توزیع هوایی، تقریباً دارای دامنه و شکل موج یکسان در سه فاز هستند [۱۸ و ۱۹].

ارزیابی اضافه ولتاژهای القایی در سناریوهای مختلف انجام می‌شود. این سناریوها عبارت‌اند از تأثیر برکگیر فشارضعیف، سیستم‌های زمین مختلف، تعداد مختلف فیدر (۲، ۵ و ۷ فیدر) و فیدر با طول‌های مختلف.



شکل (۴): مدل سیستم زمین

پارامترهای مدل مقاومتی از معادله (۱،۲)، مدل مداری از معادلات (۳-۵) و مدل خط انتقال از معادلات (۶-۱۱) بدست می‌آید. پارامترهای بدست آمده در جدول (۴) بیان شده است.

$$R = \frac{\rho}{\pi \times l} \times A_2 \quad (1)$$

$$A_2 = \frac{1}{8} \times \left[\ln\left(\frac{2 \times l}{a}\right) + \ln\left(\frac{2 \times l}{s}\right) + 2.912 - 1.071 \times \frac{s}{l} + 0.645 \times \frac{s^2}{l^2} - 0.145 \times \frac{s^4}{l^4} \right] \quad (2)$$

$$R = \frac{\rho}{\pi \times l} \left[\log \frac{2 \times l}{\sqrt{2 \times a \times h}} - 1 \right] \quad (3)$$

$$C = \pi \times \epsilon \times l \left[\log \frac{2 \times l}{\sqrt{2 \times a \times h}} - 1 \right]^{-1}, \epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_r \quad (4)$$

$$L = \frac{\mu_0 \times l}{\pi} \left[\log \frac{2 \times l}{\sqrt{2 \times a \times h}} - 1 \right] \quad (5)$$

$$R = \frac{\rho_0 \times l}{2 \times \pi \times a \times \delta} \quad (6)$$

$$L = \frac{\mu_0 \times l}{2 \times \pi} \left[\ln \frac{2l}{\sqrt{2 \times h \times a}} - 1 \right] \quad (7)$$

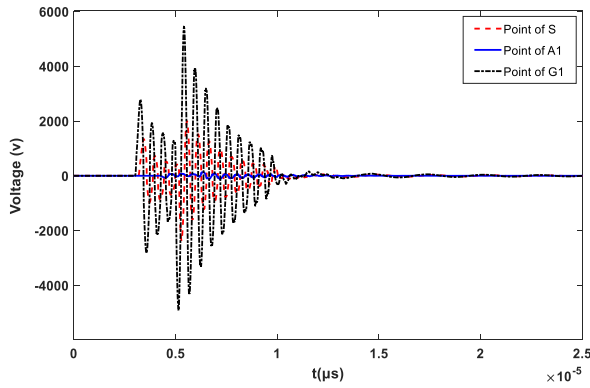
$$C = \frac{2 \times \pi \times \epsilon \times l}{\left[\ln \frac{2 \times l}{\sqrt{2 \times h \times a}} - 1 \right]} \quad (8)$$

$$R(t) = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (9)$$

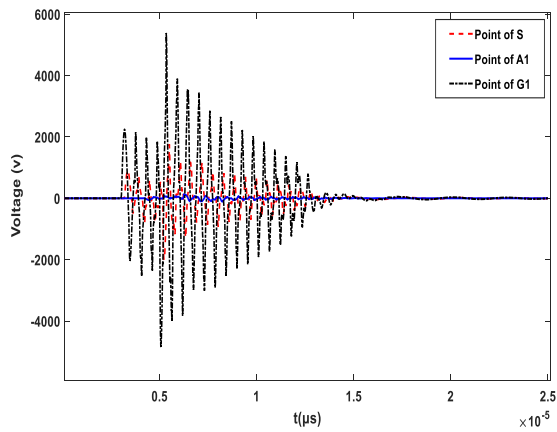
$$G(t) = \frac{2 \times \pi \times l}{\rho_s \times \left[\ln \frac{2 \times l}{\sqrt{2 \times h \times a}} - 1 \right]} \times \sqrt{1 + \frac{I(t)}{I_g}} \quad (10)$$

$$I_g = \frac{E_{cr} \times \rho_s}{2 \times \pi \times R_0^2} \quad (11)$$

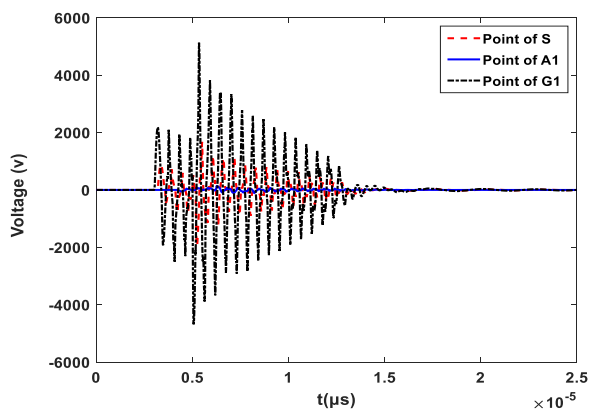
شده است. مقدار حداکثر دامنه اضافه ولتاژ نقاط S، A1 و G1 در جدول (۶) نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)



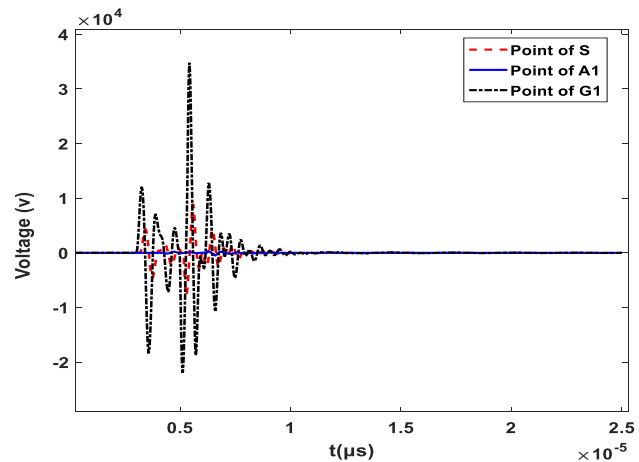
(ج)

شکل (۶): اضافه ولتاژهای منتقل شده از ترانسفورماتور با حضور برقگیر. الف) زمین مدل مقاومتی، ب) زمین مدل مداری، ج) زمین مدل خط انتقال

۳-۱- محاسبه اضافه ولتاژهای منتقل شده از

ترانسفورماتور بدون در نظر گرفتن برقگیر

ابتدا اضافه ولتاژهای منتقل شده به شبکه LV را بدون محافظت توسط برقگیر و با در نظر گرفتن سیستم زمین فرکانسی مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در شکل (۵)، شکل موج ولتاژ یک شبکه تک فیدر با ترانسفورماتور محافظت شده با اسپارک گپ و بدون برقگیر در نقاط S، A1 و G1 نشان داده شده است.



شکل (۵): اضافه ولتاژهای منتقل شده از ترانسفورماتور بدون محافظت توسط برقگیر

در جدول (۵) مقدار حداکثر دامنه اضافه ولتاژ نقاط S، A1 و G1 آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد اسپارک گپ اضافه ولتاژهای منتقل شده به شبکه LV را افزایش می‌دهد.

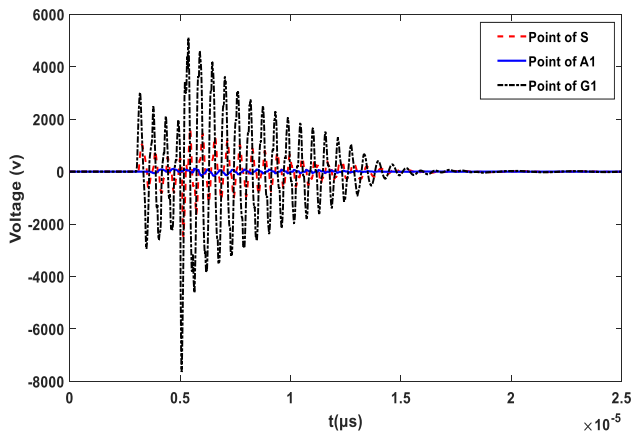
جدول (۵): اضافه ولتاژهای منتقل شده از ترانسفورماتور بدون محافظت توسط برقگیر

نقاط اندازه‌گیری شده	حداکثر دامنه ولتاژ (V)
S	۳۴۶۰۰
A1	۸۹۵۶
G1	۳۹۵

۳-۲- محاسبه اضافه ولتاژهای منتقل شده از

ترانسفورماتور با در نظر گرفتن برقگیر

برای حفاظت از شبکه در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از عملکرد اسپارک گپ در ثانویه ترانسفورماتور، ابتدا برقگیر نصب می‌شود، سپس، با استفاده از سه مدل مختلف سیستم زمین و با ثابت در نظر گرفتن بار، اضافه ولتاژها اندازه‌گیری و مورد مقایسه قرار می‌گیرند. نتایج حاصل از برخورد صاعقه با در نظر گرفتن برقگیر و مدل‌های مختلف زمین، در شکل (۶) نمایش داده



(ب)

شکل (۷): تأثیر تغییر طول فیدر. الف) افزایش طول فیدر (۷۰۰ متر) بر ولتاژ انتقال یافته، ب) کاهش طول فیدر (۱۷۵ متر) بر ولتاژ انتقال یافته مقدار حداکثر دامنه اضافه ولتاژ نقاط S، A1 و G1 در جدول (۷) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد کاهش و افزایش طول فیدر بر روی ولتاژ در نقطه ثانویه ترانسفورماتور (نقطه S) تأثیر زیادی نمی‌گذارد. این به این دلیل است که امپدانس موجی که از فیدر مشاهده می‌شود در ترمینال ثانویه با تغییر طول فیدر، تغییر نمی‌کند. با این حال، کاهش طول فیدر، اضافه ولتاژهای انتقال یافته را کاهش می‌دهد. همچنین تأثیر برقی و سیستم زمین در محدود کردن اضافه ولتاژهای منتقل شده به شبکه LV با در نظر گرفتن عملکرد اسپارک گپ تأیید می‌شود.

جدول (۷): تأثیر کاهش و افزایش طول فیدر بر ولتاژ منتقل شده از

ترانسفورماتور

نقاط اندازه‌گیری شده	حداکثر دامنه ولتاژ برای فیدر به طول ۱۷۵ متر (V)	حداکثر دامنه ولتاژ برای فیدر به طول ۷۰۰ متر (V)
S	۵۱۴۰	۵۱۴۱
A1	۱۶۰۰	۱۹۵۹
G1	۱۱۶	۲۲۴

۳-۴- تأثیر تعداد فیدر

تأثیر فیدرهای موازی زمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد که صاعقه در پایانه‌های اولیه ترانسفورماتورهای توزیع رخ دهد. شکل (۸) نشان‌دهنده اضافه ولتاژهای منتقل شده از طریق ترانسفورماتورهای توزیع بر روی ۲، ۵ و ۷ فیدر موازی است. در جدول (۸) مقدار حداکثر دامنه اضافه ولتاژ نقاط S، A و G آورده شده است. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد افزایش فیدرهای موازی منجر به کاهش ولتاژهای القایی می‌شود که عمده‌تاً به دلیل کاهش امپدانس کلی موج ناشی از اتصال مدارهای موازی به شین‌هاست.

جدول (۶): اضافه ولتاژهای منتقل شده از ترانسفورماتور با در نظر گرفتن

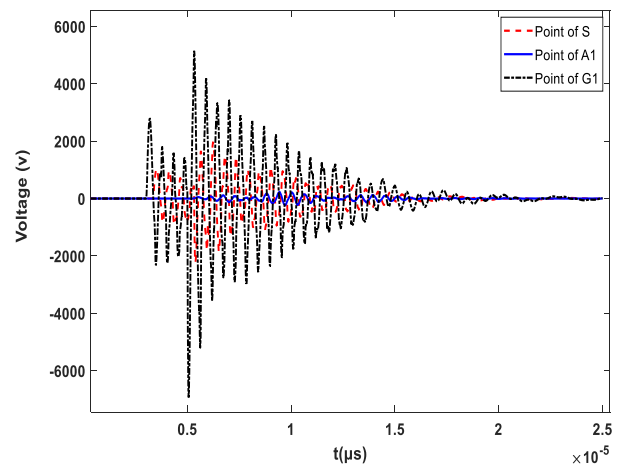
برقی

نقاط اندازه‌گیری شده	حداکثر دامنه ولتاژ ولتاژ برای مدل مقاومتی (V)	حداکثر دامنه ولتاژ برای مدل مداری (V)	حداکثر دامنه ولتاژ برای مدل خط انتقال (V)
S	۵۴۵۷	۵۳۸۳	۵۱۴۰
A1	۲۰۰۰	۱۷۵۵	۱۶۷۳
G1	۱۹۸	۱۷۳	۱۴۱

۳-۳- تأثیر افزایش و کاهش طول فیدر بر اضافه ولتاژ -

های منتقل شده از ترانسفورماتور

این بخش از مقله بر روی دو فیدر با طول‌های ۱۷۵ متر و ۷۰۰ متر انجام شده است، که یکی با کاهش طول هر خط به نصف و دیگری با افزایش طول هر خط به دو برابر آن مدل‌سازی شده است. در این شبیه‌سازی‌ها، سه مدل سیستم زمین مورد استفاده قرار گرفته و بار شبکه به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. بر این اساس، در شکل (۷) نتایج تأثیر کاهش و افزایش طول فیدر با در نظر گرفتن عملکرد اسپارک گپ، برقی و مدل‌های مختلف زمین را بر روی شبکه LV نشان می‌دهد.



(الف)

شکل (۸): تأثیر افزایش فیدرهای موازی بر اضافه ولتاژهای منتقل شده از ترانسفورماتور. (الف) ۲ فیدر، (ب) ۵ فیدر، (ج) ۷ فیدر

جدول (۸): تأثیر افزایش تعداد فیدرهای موازی بر ولتاژ منتقل شده از ترانسفورماتور

ترانسفورماتور			
نقاط اندازه‌گیری شده	حداکثر دامنه ولتاژ با در نظر گرفتن ۲ فیدر (V)	حداکثر دامنه ولتاژ با در نظر گرفتن ۵ فیدر (V)	حداکثر دامنه ولتاژ با در نظر گرفتن ۷ فیدر (V)
S	۴۹۲۸	۴۴۰۹	۳۹۹۸
A	۱۵۱۵	۱۳۱۰	۱۲۲۲
G	۹۸	۵۵	۱۹

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تلاش شده است تا با بهبود دادن مدل گذرای ترانسفورماتور و ترکیب آن با مدل گذرای سیستم زمین با در نظر گرفتن یونیزاسیون خاک اطراف آن، اثرات اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه را بر روی تجهیزات و بارهای متصل شده به شبکه LV ارزیابی کند. همچنین، تأثیر برقی‌گیر و افزایش تعداد فیدرها و تغییرات در طول آن‌ها بر روی اضافه ولتاژهای شبکه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

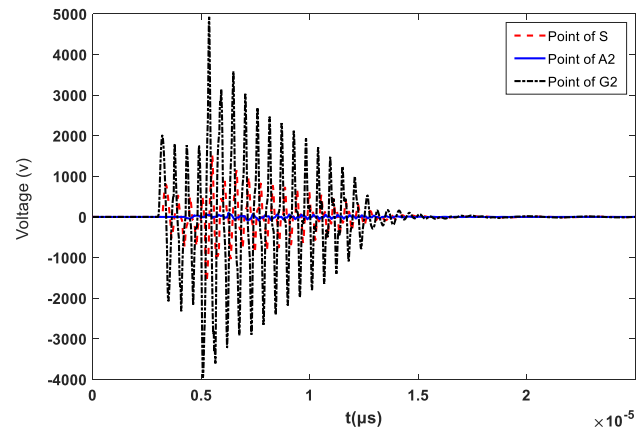
بر اساس نتایج بدست آمده، اضافه ولتاژهای منتقل شده از ترانسفورماتور محافظت شده به وسیله اسپارک گپ و بدون استفاده از برقی‌گیر به ۳۵ کیلوولت می‌رسد. این موضوع با توجه به پایین بودن سطح استحکام عایقی در شبکه LV و افزایش استفاده از وسایل الکترونیکی حساس، ممکن است باعث اختلال در عملکرد شبکه شود.

نتایج مدل‌سازی برقی‌گیر و سیستم زمین نشان داد که با در نظر گرفتن یونیزاسیون خاک و بهبود یافتن زمین شبکه، سطح اضافه ولتاژها به ۵۱۴۰ ولت کاهش پیدا می‌کند. به علاوه با کاهش یافتن طول فیدر به نصف مقدار آن، اضافه ولتاژها در انتهای خط به ۱۱۴ ولت محدود شدند. همچنین افزایش تعداد فیدرهای موازی به ۷ فیدر، منجر به کاهش اضافه ولتاژهای منتقل شده از ترانسفورماتور به کمتر از ۴ کیلوولت شد.

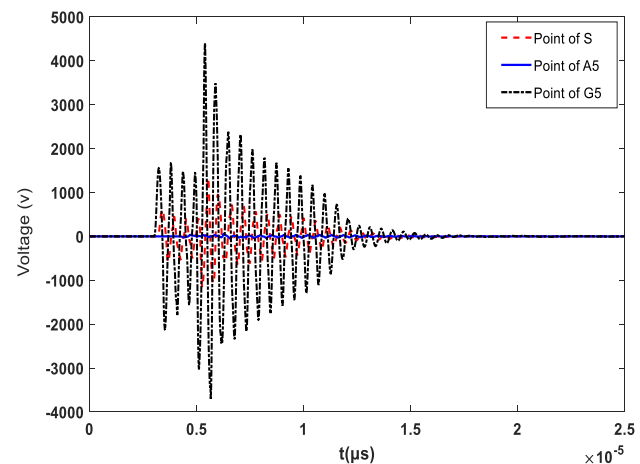
مراجع

- [1] M. S. Vieira, and J. M. Janiszewski, "Propagation of lightning electromagnetic fields in the presence of buildings," *Electric power systems research*, vol. 118, pp. 101-109, 2015.
- [2] N. A. Sabiha, I. A. Hend, and L. Matti, "High frequency modeling and experimental verification of distribution transformers using transfer function approach," *Electric Power Systems Research*, vol. 204, pp. 107671, 2022.
- [3] F. H. Silveira, and S. Visacro, "Evaluation of lightning-induced voltages on low-voltage distribution networks," *IX*

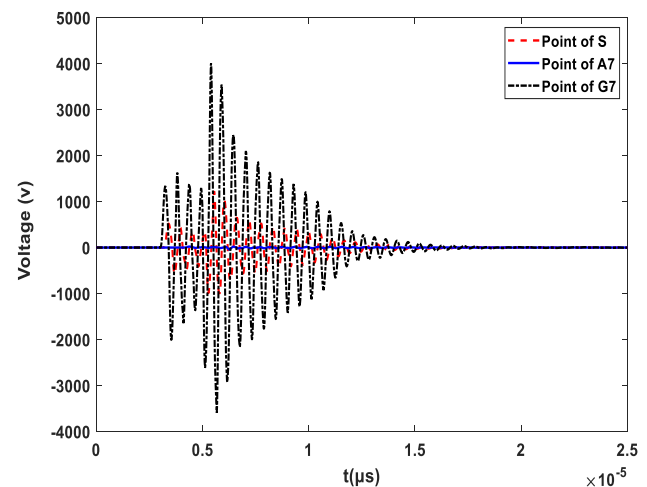
این آرایش می‌تواند حفاظت در برابر اضافه ولتاژ صاعقه را بهبود داده و اضافه ولتاژهای صاعقه‌ای که در شین‌ها ایجاد می‌شود را کاهش دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

- lightning overvoltages in resonant grounded power distribution networks,” *Electric Power Systems Research*, vol. 113, pp. 121-128, 2014.
- [12] A. Andreotti, A. Pierno and V. A. Rakov, “A New Tool for Calculation of Lightning-Induced Voltages in Power Systems—Part II: Validation Study,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 334-341, 2015.
- [13] T. A. Short, “IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines,” *IEEE Std.*, pp. 1410–2010, 2011.
- [14] P. Pinceti and M. Giannetoni, “A simplified model for zinc oxide surge arresters,” *IEEE transactions on power delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 393–398, 1999.
- [15] S. Pili’ski’c, I. Ugle’si’c, B. Juri’si’c, “Evaluating the overvoltage performance of an overhead line taking into account the frequency-dependence of its tower’s grounding electrodes with high soil resistivity,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 116, p.105547, 2020.
- [16] P. Yutthagowith, “A modified pi-shaped circuit-based model of grounding electrodes,” *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). IEEE*, pp. 1–4, 2016.
- [17] G. Maslowski, S. Wyderka, R. Ziemba, G. Karnas, K. Filik, And L. Karpinski, “Measurements and modeling of current impulses in the lightning protection system and internal electrical installation equipped with household appliances,” *Electric Power Systems Research*, vol. 139, pp. 87-92, 2016.
- [18] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, *IEEE Std 1410-2010*, pp. 1–73, 2011.
- [19] N. Sabiha, M. Lehtonen, N. Tarhuni, and P. Hyvönen, “Probabilistic model for MV spark-gap characteristics with lightning induced overvoltage superimposed on AC voltage,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, no. 5, pp. 1404–1412, 2009.
- International Symposium on Lightning Protection*, pp. 335-340, 2007.
- [4] J. Cao, Y. Du, Y. Ding, R. Qi, B. Li, M. Chen, and Z. Li, “Practical schemes for lightning energy suppression in arresters for transformers on 10 kV overhead distribution lines,” *IEEE Transactions on Power*, vol. 113, pp. 121-128, 2014.
- [5] F. O. Resende and J. A. Peças Lopes, “Using low-voltage surge protection devices for lightning protection of 15/0.4 kV pole-mounted distribution transformer,” *CIREC Open Access Proc. J.*, vol. 2017, no. 1, pp. 888–892, 2017.
- [6] A. De Conti, F. H. Silveira, and S. Visacro, “On the role of transformer grounding and surge arresters on protecting loads from lightning-induced voltages in complex distribution networks,” *Electric Power Systems Research*, vol. 113, pp. 204-212, 2014.
- [7] A. De Conti, F. H. Silveira, and S. Visacro, “On the role of transformer grounding and low-voltage surge arresters on protecting loads in complex distribution networks,” *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP). IEEE*, pp. 1-7, 2012.
- [8] T. A. Papadopoulos, A. I. Chrysochos, A. I. Nousedilis, and G. K. Papagiannis, “Simplified measurement-based black-box modeling of distribution transformers using transfer functions,” *Electric Power Systems Research*, vol. 121, pp. 77–88, 2015.
- [9] E. E. Mombello and G. A. Diaz Florez, “An improved high frequency white-box lossy transformer model for the calculation of power systems electromagnetic transients,” *Electric Power Systems Research*, vol. 190, p. 106838, 2021.
- [10] D. S. Gazzana, A. S. Bretas, G. A. D. Dias, M. Telló, D. W. P. Thomas, and C. Christopoulos, “The Transmission line modeling method to represent the soil ionization phenomenon in grounding systems,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, pp. 505-508, 2014.
- [11] F. Napolitano, A. Borghetti, C. A. Nucci, M. L. B. Martinez, G. P. Lopes, and G. J. G. Dos Santos, “Protection against

⁷ Rusck

⁸ Two-port network

⁹ Metal Oxide surge arrester

¹⁰ P. Pinceti

¹ Spark-Gap

² Flashover

³ Curve Fitting

⁴ Particle Swarm Optimization

⁵ transmission line modeling method

⁶ Electromagnetic pulse